

Ein Funktionsschema zur Bestimmung der Tonhöhe des Zwicker-Tones

G. KRUMP*

Lehrstuhl für Mensch-Maschine-Kommunikation, Technische Universität München

*jetzt: NOKIA Audio Electronics, Straubing

1. Einführung

Nach dem abrupten Abschalten einer mindestens 2 Sekunden lang andauernden Anregung mit geeigneter spektraler Zusammensetzung ist für 2 bis 6 Sekunden ein leiser, abklingender Nachton wahrzunehmen, der in der Literatur nach seinem Entdecker auch als Zwicker-Ton bezeichnet wird [5,7]. Der Schallreiz kann dabei ein mindestens 1 Bark breites Bandpaß- oder ein Tiefpaßsignal sein, nach dessen Abschalten der Nachton oberhalb der oberen Grenzfrequenz gehört wird [2,3]. Den besten Zwicker-Ton-Erzeugerschall (ZTE) stellt jedoch ein breitbandiges Signal mit einer mindestens 1 Bark breiten und wenigstens 15 dB tiefen spektralen Lücke dar, welches stets einen Nachton innerhalb dieser Lücke hervorruft [1,2]. Eine weitere Möglichkeit zur Erzeugung eines Nachtones besteht in der Darbietung einer breitbandigen Anregung mit spektraler Überhöhung in Form eines additiv hinzugefügten Sinustones oder schmalbandigen Signales von maximal 1 Bark Breite, wobei sich die relevanten Frequenzgruppenpegel um wenigstens 25 dB unterscheiden sollten. Der Zwicker-Ton ist hierbei jeweils unterhalb der spektralen Überhöhung wahrnehmbar [2,4]. Im folgenden wird ein Funktionsschema vorgestellt, das für die unterschiedlichsten Erzeugerschalle mit Hilfe der entsprechenden Mithörschwellen-Tonheitsmuster eine Vorherbestimmung der Tonhöhe des Nachtones erlaubt [2].

Als Anregung wurden rechnergenerierte, harmonische Linienspektren mit konstanten Amplituden und zufällig verteilten Phasen verwendet. Die spektrale Überhöhung wurde durch Addition entsprechender Spektrallinien erreicht. Die Mithörschwellen-Tonheitsmuster wurden gemäß Zwicker und Fastl [8], die Ruheshchwelle nach Torhardt et al. [6] berechnet. Die nach dem Funktionsschema bestimmte Tonhöhe des Nachtones wird in den nachfolgenden Figuren durch einen Stern gekennzeichnet. Die Kontrollversuche basieren auf den Angaben von normalhörenden Personen, die nach einer monaural über Kopfhörer (Beyer DT 48) mit Freifeldentzerrer [8] dargebotenen Anregung einen Vergleichston im Pegel und in der Frequenz dem wahrgenommenen Zwicker-Ton anglich. Zentralwerte und Wahrscheinliche Schwankungen von jeweils vier Durchgängen wurden in die Tonheit umgerechnet [8] und sind für jede Person als Symbole mit Linien dargestellt. Ebenso sind die Zentralwerte der in sechs Kategorien eingeteilten Qualität Q_{ZT} des Zwicker-Tones (siehe Fig. 3), welche im wesentlichen von Lautheit, Dauer und Ausgeprägtheit der Tonhöhe des Nachtones bestimmt wird, angegeben.

2. Funktionsschema

In Fig. 1 sind die berechneten Mithörschwellen-Tonheitsmuster eines Linienspektrums mit spektraler Lücke zwischen 15,9 Bark (3150 Hz) und 18,4 Bark (4850 Hz) bei Darbietungspegeln L_{ZTE} von 40 bis 70 dB durch Geraden angenähert. Bei geringen Pegeln weisen obere und untere Flanke eine Steigung von 27 dB/Bark auf und schneiden die Ruheshchwelle. Mit zunehmendem Pegel ist die nichtlineare Auffächerung der unteren Flanke der Lücke deutlich zu erkennen, welche zusammen mit der oberen Flanke einen „Trichter“ bildet.

Der Nachton befindet sich bei den Tonheiten, bei denen die Mithörschwelle des Tiefpaßanteiles des Erzeugerschalles die Ruheshchwelle schneidet, wie dies für einen Pegel von 40 und 50 dB der Fall ist. Da bei geringen Pegeln nur die untere Flanke von Bedeutung ist, wird daher sowohl bei Signalen mit spektraler Lücke als auch bei einer tiefpaßbegrenzten Anregung mit vergleichbaren Frequenzgruppenpegeln der Nachton wie in der Literatur beschrieben mit der gleichen Tonhöhe wahrgenommen [2,3]. Kommt bei höheren Pegeln infolge der nichtlinearen Auffächerung kein Schnittpunkt zwischen Mithörschwelle und Ruheshchwelle zustande, so befindet sich die Tonhöhe des Nachtones beim Minimum der Mithörschwelle, sofern es tief genug ist, um einen Zwicker-Ton hervorzurufen. Seine Tonhöhe wandert deshalb bei Pegeln von 60 und 70 dB zu höheren Tonheiten. Diese Verschiebung wird bei breiteren Lücken deutlicher, da stets die gesamte Lückenbreite ausgenutzt

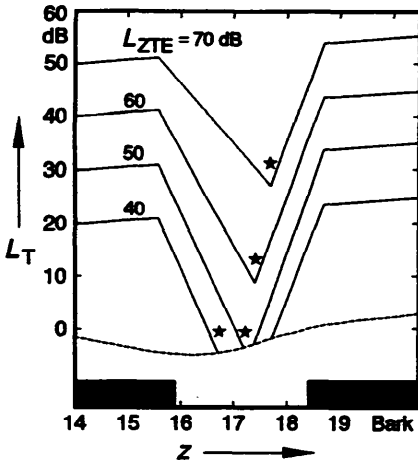


Fig. 1: Testtonpegel L_T der berechneten Mithörschwellen-Tonheitsmuster von Linienspektren mit spektraler Lücke zwischen 15,9 und 18,4 Bark bei verschiedenen Darbietungspegeln L_{ZTE} (durchgezogen). Gestrichelte Kurve: Ruhhörschwelle. Stern: Berechnete Tonhöhe des Nachttones. Schraffierte Fläche: Anregung mit spektraler Lücke.

det, falls zwischen beiden Hörschwellen eine Pegeldifferenz von mindestens 15 dB (ab $L_{ST} = 50$ dB) auftritt. Die Tonhöhe ist aufgrund der unterschiedlichen Steigungen der unteren Flanken der Mithörschwellenmuster nur geringfügig vom Pegel des Simustones abhängig [4]. Wird hingegen bei einem konstanten Pegel des Simustones von 60 dB der Pegel des Grund-Linienspektrums erniedrigt, so wandert in Einklang mit Daten aus der Literatur [4] der Zwicker-Ton zu etwas tieferen Tonhöhen. In gleicher Weise kann die Tonhöhe des Nachttones vorausberechnet werden, wenn statt des Simustones ein schmalbandiges Signal mit einer Bandbreite von höchstens 1 Bark addiert wird. Bei größerer Bandbreite ist kein Nachtton mehr wahrnehmbar.

Mit Hilfe der Mithörschwellen-Tonheitsmuster können die zur Erzeugung eines Zwicker-Tones notwendigen Pegeldifferenzen veranschaulicht werden. Untersuchungen zur minimalen Lückentiefe zeigen, daß bei einer Tiefe der spektralen Lücke von 15 dB der Nachtton von den Versuchspersonen gerade noch wahrgenommen werden kann [2]. Dementsprechend beträgt an der unteren Lückengrenze der Pegelunterschied zwischen der Frequenzgruppe außerhalb und innerhalb der spektralen Lücke ebenfalls 15 dB, so daß auch bei den zugehörigen Mithörschwellen Minima von 15 dB entstehen. Bei einer Anregung mit Linienspektren ohne Lücke kombiniert mit einem Simuston sind hingegen Frequenzgruppenpegeldifferenzen von 25 dB nötig, um einen Nachtton hervorzurufen [4]. Da jedoch die Mithörschwelle eines Simustones gemäß [8] 10 dB unter seinem Pegel L_{ST} liegt, erhält man im Mithörschwellen-Tonheitsmuster auch bei diesen Zwicker-Ton-Erzeugerschallen eine minimale Pegeldifferenz von 15 dB, ab welcher der Nachtton hörbar ist.

Der Zwicker-Ton kann durch spontane otoakustische Emissionen beeinflusst werden. Liegt die Tonhöhe eines Nachttones aufgrund der Konstellation der spektralen Lücke in der Nähe einer Emissionsstelle, so kann nach dem Abschalten der Anregung bei dieser Frequenz ein Ton wahrgenommen werden, der mitunter sogar bis zu einer halben Minute lang andauert. Die Qualität dieses Tones, dessen Vergleichsfrequenz sehr genau eingestellt werden kann, ist meist wesentlich besser als die des unbeeinflussten Nachttones [1,2]. Der Einflußbereich

wird. Ein Darbietungspegel von 80 dB hingegen verursacht eine so flache untere Flanke (7 dB/Bark), daß bei dieser Lückenbreite aufgrund der geringen Tiefe des Mithörschwellenminimums von weniger als 15 dB kein Zwicker-Ton mehr feststellbar ist [1]. Die Mithörschwelle des Hochpaßanteiles der Anregung ist somit erst dann von Bedeutung, wenn sich ein Schnittpunkt mit der Mithörschwelle der unteren Flanke ergibt, d. h. bei hohen Darbietungspegeln oder bei sehr schmaler spektraler Lücke. Ein hochpaßgefiltertes Signal alleine erzeugt keinen Zwicker-Ton.

Im Gegensatz dazu ist in Fig. 2 das Mithörschwellen-Tonheitsmuster einer Anregung mit spektraler Überhöhung dargestellt. Das Grund-Linienspektrum mit einem Gesamtpegel von 40 dB bewirkt infolge der wachsenden Frequenzgruppenbreite eine mit zunehmender Tonhöhe leicht monoton ansteigende Mithörschwelle. Eine Anhebung erfolgt durch den überlagerten Simuston bei 15,6 Bark (3000 Hz), dessen Pegel L_{ST} von 30 bis 80 dB variiert wurde. Die entsprechenden Mithörschwellen sind in Fig. 2 schematisch eingezeichnet.

Der Nachtton entsteht bei Tonhöhen, bei denen die untere Flanke des Mithörschwellenmusters des Simustones die Mithörschwelle des Grund-Linienspektrums schneidet,

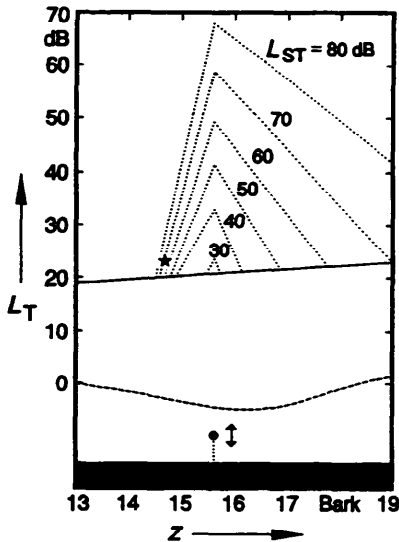


Fig. 2: Testtonpegel L_T der berechneten Mithörschwellen-Tonheitsmuster von einem Grund-Linienspektrum (durchgezogen) kombiniert mit einem Sinuston bei 15,6 Bark mit unterschiedlichem Pegel L_{ST} (punktiert). Gestrichelte Kurve: Ruhehörschwelle. Stern: Berechnete Tonhöhe des Nachttones. Schraffierte Fläche: Anregung mit Sinuston.

3. Kontrollversuche

Die Zuverlässigkeit dieses Funktionsschemas wurde bei mehr als 50 unterschiedlichen Versuchsreihen mit insgesamt 14 Versuchspersonen mittels rechnerisimulierter Mithörschwellen überprüft. Hierbei war die Tonhöhe bereits auf etwa 0,3 Bark genau bestimmbar. Unter Einbeziehung individueller Abweichungen konnte mit gemessenen Ruhe- und Mithörschwellen der Versuchspersonen die Genauigkeit auf 0,15 Bark erhöht werden.

Eine der zahlreichen Untersuchungen bestand darin, daß Linienspektren mit definiertem spektralen Minimum bei 17,1 Bark (3900 Hz) generiert wurden. Die Lückentiefe betrug dabei jeweils 30 dB, während die Breite der Lücke zwischen 1,5 und 7,5 Bark variiert wurde, so daß verschiedene Flankensteilheiten entstanden, die jedoch flacher als diejenigen des Gehörs waren. Dadurch bildete sich auch im Mithörschwellen-Tonheitsmuster ein entsprechendes Minimum aus, bei dem den Erwartungen gemäß stets ein Nachtton wahrgenommen wurde.

In einer weiteren Versuchsreihe wurde das Mithörschwellen-Tonheitsmuster verändert, indem einem Linienspektrum mit einer spektralen Lücke zwischen 15,4 Bark (2900 Hz) und 18,9 Bark (5300 Hz) mit Hilfe eines Addierverstärkers ein Sinuston mit unterschiedlichem Pegel L_{ST} zwischen 30 dB und 70 dB zugesetzt wurde. Die Tonhöhe dieses Zusatztones betrug 16 Bark (3200 Hz). Fig. 3 zeigt im oberen Teilbild die Ergebnisse von sechs Versuchspersonen bei einem Darbietungspegel des Linienspektrums von 40 dB. Im unteren Teilbild sind die zugehörigen Mithörschwellen-Tonheitsmuster skizziert. Ohne Sinuston befinden sich die Tonhöhenangaben beim Schnittpunkt von Mithörschwelle und Ruhehörschwelle. Ein zusätzlicher Sinuston mit einem Pegel von 30 und 40 dB verschiebt den Zwicker-Ton dem Funktionsschema entsprechend zu etwas höheren Tonhöhen. Bei 50 dB wird die Tiefe der spektralen Lücke bereits geringer, zumal die Ruhehörschwelle der meisten Versuchspersonen über 18 Bark im Vergleich zur Normalruhehörschwelle vielfach um mehr als 10 dB angehoben

einer starken spontanen Emission beträgt hierbei ungefähr 200 Hz. Bei Anregung mit spektraler Überhöhung wird hingegen keine Beeinflussung durch spontane Emissionen festgestellt. Da der unbeeinflusste Nachtton weder bei hochpaßfilterten Signalen noch bei einem einzelnen Sinuston auftritt, ist zumindest im Tiefpaßbereich, d. h. unterhalb der spektralen Lücke bzw. des Sinustones eine Anregung notwendig. Zur Berechnung der Tonhöhe des Nachttones läßt sich daher folgende einfache Regel aufstellen:

Weist das Mithörschwellen-Tonheitsmuster einer bereits bei tiefen Tonhöhen vorhandenen Anregung ein spektrales Minimum bzw. eine spektrale Überhöhung mit einer Pegeldifferenz von mindestens 15 dB auf, so befindet sich die Tonhöhe des nach dem Abschalten entstehenden, unbeeinflussten Nachttones beim Schnittpunkt dieser Mithörschwelle mit der Ruhehörschwelle. Falls kein Schnittpunkt vorhanden ist, entsteht der Zwicker-Ton beim Minimum der Mithörschwelle bzw. bei der spektralen Kante, welche durch den Anstieg der Mithörschwelle verursacht wird.

Die Mithörschwellen-Tonheitsmuster lassen erkennen, daß bei Anregung mit spektraler Lücke kein entsprechendes Schmalbandrauschen wahrgenommen werden kann. Das Gehör verändert die spektrale Hüllkurve des physikalischen Reizes so stark, daß stets ein Minimum oder eine spektrale Kante entsteht, wodurch auf bisher noch ungeklärte Weise ein Nachtton hervorgerufen wird.

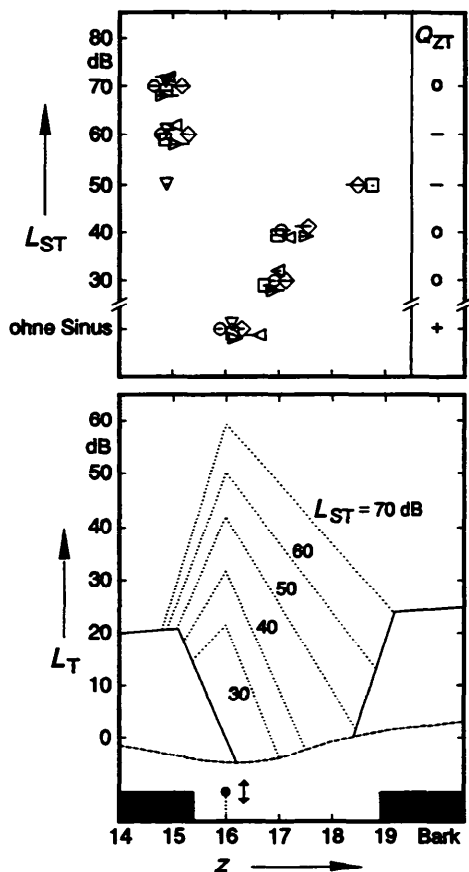


Fig. 3: oben: Tonheit z und Qualität Q_{ZT} des Zwicker-Tones bei unterschiedlichem Pegel L_{ST} eines zusätzlichen Sinustones. Zentralwert (Symbole) und Wahrscheinliche Schwankungen (Linien). Tonheit des Sinustones: 16 Bark. Pegel des Linienspektrums: 40 dB. Der Zwicker-Ton wurde sehr gut (++), gut (+), mittel (o), schlecht (-), sehr schlecht (-) oder nicht (x) gehört. unten: Testtonpegel L_T der berechneten Mithörschwellen-Tonheitsmuster. Schraffierte Fläche: Linienspektrum mit Lücke und Sinuston.

ist. Der Nachton wird deshalb nur noch von zwei Personen im Bereich von 18,6 Bark gehört, während ihm eine Versuchsperson bereits wesentlich tiefer an der unteren Kante der Mithörschwelle um 15 Bark wahrnimmt. Seine Qualität wird dementsprechend in die Kategorie „schlecht“ eingestuft. Bei Pegeln von 60 dB und insbesondere 70 dB wird die spektrale Lücke vollends vom zusätzlichen Sinuston verdeckt, so daß der Nachton von allen Personen am Beginn der unteren Flanke des Mithörschwellenmusters des Sinustones registriert wird. Ein Pegel des Sinustones von 70 dB führt im Mithörschwellen-Tonheitsmuster zu einer Pegeldifferenz von etwa 40 dB, so daß in Übereinstimmung mit Literaturdaten [4] die Qualität Q_{ZT} wieder zunimmt und mit „mittel“ beurteilt wird. Dieser Versuch zeigt damit sehr anschaulich den Übergang von Erzeugerschall mit spektraler Lücke zu solchen mit spektraler Überhöhung. Das vorgestellte Funktionsschema kann in jedem Falle die Tonhöhe des Nachtones sehr zuverlässig in guter Näherung beschreiben.

Der Autor dankt allen Versuchspersonen für die geduldige Teilnahme an den Experimenten, insbesondere Herrn Prof. Dr.-Ing. H. Fastl für zahlreiche Anregungen und Hinweise. Diese Arbeit wurde von der Deutschen Forschungsgemeinschaft über den SFB 204 „Gehör“, München gefördert.

Literatur

- [1] Krump G., *Zum akustischen Nachton bei Linienspektren*. In: Fortschritte der Akustik, DAGA'90, Verlag: DPG-GmbH, Bad Honnef, 567-570 (1990).
- [2] Krump G., *Beschreibung des akustischen Nachtones mit Hilfe von Mithörschwellenmustern*. Dissertation an der TU München (1993a).
- [3] Krump G., *Zum Zwicker-Ton bei unterschiedlicher Bandbreite der Anregung*. In: Fortschritte der Akustik, DAGA'93, Verlag: DPG-GmbH, Bad Honnef, 808-811 (1993b).
- [4] Krump G., *Zum Zwicker-Ton bei Linienspektren mit spektraler Überhöhung*. In: Fortschritte der Akustik, DAGA'94, Verlag: DPG-GmbH, Bad Honnef, 1009-1012 (1994).
- [5] Lummis R. C. und Guttman N., *Exploratory Studies of Zwicker's "Negative Afterimage" in Hearing*. J. Acoust. Soc. Amer. 51, 1930-1944 (1972).
- [6] Terhardt E., Stoll G. und Seewann M., *Algorithm for extraction of pitch and pitch salience from complex tonal signals*. J. Acoust. Soc. Amer. 71, 679-688 (1982).
- [7] Zwicker E., *"Negative Afterimage" in Hearing*. J. Acoust. Soc. Amer. 36, 2413-2415 (1964).
- [8] Zwicker E. und Fastl H., *Psychoacoustics - Facts and Models*. Springer-Verlag, Heidelberg (1990).